



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO DE UN ALGORITMO DE
DIAGNÓSTICO DE FALLAS BASADO EN
EL MODELO PARA UN SISTEMA DE 1/4
DE SUSPENSIÓN EN UN AUTOMÓVIL

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTA

NAZARIO CANO CHACU

ASESOR:

DR. JUAN ANZUREZ MARIN



Morelia Mich, Febrero, 2023

Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería Eléctrica y a la Universidad Michoacana De San Nicolás de Hidalgo, por la formación que me han dado y ser parte de ella y abrireme las puertas de su seno científico para poder estudiar mi carrera, así como también a los diferentes docentes que brindan sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante día a día.

Agradezco también a mi asesor de Tesis el Dr. Juan Anzures Marin por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también por haberme tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis.

Y para finalizar, también agradezco a todos los que fueron mis compañeros de clase durante todos los años que estuvimos en la Universidad ya que gracias a la amistad y apoyo moral han aportado en gran parte mis ganas de seguir adelante en mi carrera profesional.

Es gracias a ustedes que es posible el presente trabajo.
En verdad, gracias.

Nazario Cano Chacu.

Dedicatorias

Esta tesis se la dedicó a Dios quien supo guiarme por el buen camino, darme las fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaron, enseñándome a enfrentar las adversidades y la sabiduría para superarlas.

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a Ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis sueños.

Es gracias a ustedes que es posible el presente trabajo.
En verdad, gracias.

Nazario Cano Chacu.

Índice general

Agradecimientos	II
Dedicatorias	IV
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	IX
Resumen	1
Abstract	2
1. Introducción	5
1.1. Antecedentes	6
1.2. Objetivo general	8
1.2.1. Objetivos específicos	8
1.3. Hipótesis	9
1.4. Justificación	9
1.5. Metodología	9
1.6. Contenido de la Tesis	9
2. Diagnóstico de fallas	11
2.1. Diagnóstico de fallas basado en observadores	11
2.2. Observador de Luenberger	12
2.3. Observador difuso con modos deslizantes	15
3. Caso de estudio	17
3.1. Sistema de Suspensión: Fundamentos Teóricos	17
3.2. El sistema de suspensión: aspectos generales	17
3.3. Modelado del sistema 1/4 suspensión de automóvil	18
3.4. Representación del sistema en ecuaciones de estado	19
3.5. Cálculo de parámetros	20
3.5.1. Estabilidad y observabilidad	21
3.6. Diseño del observadores para el diagnóstico de fallas	23
3.6.1. Observador de Luenberger	24

3.6.2. Observador de Luenberger con modos deslizantes	27
3.7. Diagnóstico de fallas	28
3.7.1. Observador de Luenberger	28
3.7.2. Observador de Luenberger con modos deslizantes	30
4. Conclusiones	37

Índice de figuras

2.1.	Estructura general del sistema de diagnóstico de fallas	13
2.2.	Estructura de un observador de estado	14
3.1.	Esquema de un modelo de un cuarto de vehículo.	19
3.2.	Esquema del modelo de suspensión de un cuarto de vehículo en Simulink de Matlab.	23
3.3.	Señal de estrada al sistema de suspensión $u(t)$	23
3.4.	Salidas del sistemas ante una entrada $u(t)$	24
3.5.	Diagrama del observador de Luenberger.	27
3.6.	Salida real del sistemas ante una entrada $u(t)$	28
3.7.	Salida estimada del sistemas ante una entrada $u(t)$	29
3.8.	Diagrama de Observador de Luenberger de Modos Deslizantes.	29
3.9.	Esquema del observador de Luenberger.	30
3.10.	Comportamiento del residuo para un sistema libre de fallas.	31
3.11.	Comportamiento del residuo 1 y 2 ante una falla.	31
3.12.	Comportamiento de residuo 1 y 2 ante la presencia de dos fallas.	32
3.13.	Esquema del observador de modos deslizantes.	32
3.14.	Comportamiento de residuo 1 y 2 para un sistema libre de fallas.	33
3.15.	Comportamiento de residuo 1 y 2 ante la presencia una falla en el sensor 2.	34
3.16.	Comportamiento de residuo 1 y 2 ante la presencia de una falla múltiple.	34
3.17.	Comportamiento de residuo ante un cambio en los parámetros, observador de modos deslizantes.	35
3.18.	Comportamiento de residuo ante un cambio en los parámetros, observador de Luenberger.	35

Índice de tablas

3.1. Valores utilizados en la simulación del modelo de un cuarto de vehículo . . .	21
--	----

Resumen

El presente trabajo de tesis muestra que es necesario ofrecer sistemas de control que garanticen la seguridad de entorno; por esta razón, se plantea una solución al problema del diagnóstico de fallas en sistemas no lineales, para lo cual se hace un estudio de los métodos de generación de residuos o señales de falla, las cuales indican una operación consistente o inconsistente del sistema y que basan su principio de funcionamiento en la comparación de la información de la salida medida del sistema con la información de la salida estimada a través de un observador de estados.

El estudio realizado sobre observadores, particularmente sobre el observador de Luenberger, y el observador de Luenberger con modos deslizantes, presenta la metodología de diseño de dichos observadores. Se propone una solución al problema del Diagnóstico de Fallas basado en el análisis de los residuos mediante la comparación de un umbral propuesto, con lo cual se toma la decisión respecto a una posible falla en el sistema. Para el diseño de los observadores se realizan estudios de estabilidad basado en Lyapunov y Desigualdades lineales.

Se presentan simulaciones sobre un sistema no-lineal de un sistema de suspensión de un 1/4 de automóvil, todas las simulación se llevaron a cabo con la ayuda de Matlab. Las pruebas realizadas fueron considerando un sistema con fallas, un sistema libre de fallas y un sistema con perturbaciones, donde se verifica que las técnicas aplicadas sean eficientes, proporcionando resultados que permiten establecer que el diseño de observadores de Luenberger y de modos deslizantes proporcionan una herramienta útil para el problema del diagnóstico de fallas en sistemas de los cuales conocemos el modelo, por esta razón, a estas técnicas se les conoce como "*basadas en el modelo*".

Palabras clave:

Observadores, Diagnóstico de fallas, Residuo, Modos Deslizantes, desigualdades lineales matriciales.

Abstract

This thesis work shows that it is necessary to offer control systems that guarantee the safety of the environment; For this reason, a solution to the problem of fault diagnosis in non-linear systems is proposed, for which a study is made of the methods for generating residuals or fault signals, which indicate a consistent or inconsistent operation of the system and that They base their operating principle on the comparison of the information of the measured output of the system with the information of the estimated output through a state observer.

The study carried out on observers, particularly on the Luenberger observer, and the Luenberger observer with sliding modes, presents the design methodology of said observers. A solution to the problem of Failure Diagnosis is proposed based on the analysis of residues by comparing a proposed threshold, with which the decision is made regarding a possible failure in the system. For the design of the observers, stability studies are carried out based on Lyapunov and Linear Inequalities.

Simulations on a non-linear system of a suspension system of a 1/4 car are presented, all the simulations were carried out with the help of Matlab. The tests carried out were considering a system with faults, a system free of faults and a system with disturbances, where it is verified that the applied techniques are efficient, providing results that allow us to establish that the design of Luenberger observers and sliding modes provide a tool useful for the problem of fault diagnosis in systems of which we know the model, for this reason, these techniques are known as "*model-based*".

Capítulo 1

Introducción

En la industria automotriz, el confort y la estabilidad son características esenciales para que el modelo de un vehículo cumpla con las especificaciones que demanda el mercado actual. El confort y la estabilidad nos garantizan las condiciones de comodidad y de seguridad, respectivamente.

El sistema de suspensión es el encargado de aislar al chasis del movimiento causado por las irregularidades del terreno y, al mismo tiempo, asegura que las ruedas se mantengan en contacto con la carretera.

La calidad de la actuación de la suspensión no sólo afecta directamente al desempeño del manejo y la comodidad del viaje, sino también la seguridad en la conducción, la maniobrabilidad, la estabilidad y el ahorro de combustible. En la actualidad existen tres tipos de suspensiones vehiculares.

En primer lugar, tenemos a las suspensiones pasivas que sólo se encargan de almacenar energía por medio de resortes helicoidales y de disipar la energía mediante amortiguadores. Estos elementos tienen parámetros fijos y son establecidos de acuerdo a su compromiso entre confort y estabilidad.

Luego están las suspensiones activas, que tienen la capacidad de disipar, almacenar y generar energía ya que cuentan con actuadores que inyectan energía dentro del sistema. Estos sistemas necesitan de sensores para medir la aceleración de la masa suspendida y la de la masa no suspendida, como también sensores que miden el desplazamiento de la suspensión (deflexión). Generalmente, estas suspensiones remueven totalmente del sistema todos los elementos pasivos que son reemplazados por el actuador activo, el cual demanda una gran cantidad de energía para lidiar con las irregularidades del terreno.

Por último, tenemos las suspensiones semi-activas que son una solución promedio entre las dos suspensiones antes mencionadas. Estas cuentan con un amortiguador, el cual posee un coeficiente de amortiguamiento que varía según los requerimientos del sistema. De esta manera este tipo de suspensión sólo demanda una pequeña cantidad de energía

para el dispositivo electrónico que controla a este amortiguador.

1.1. Antecedentes

En [1], Hedrick, se hace uso de observadores de estado para sistemas no lineales con el objeto de mejorar la calidad del viaje en una suspensión activa, y observadores de estado para sistemas bilineales para reducir la dinámica de la carga del neumático en una suspensión semi-activa de un vehículo pesado. El método propuesto garantiza la convergencia exponencial de las estimaciones, incluso ante la presencia de perturbaciones.

Los parámetros desconocidos de un modelo pueden ser obtenidos experimentalmente usando estimación paramétrica y LOLIMOT (Local Linear Model Tree), un tipo especial de redes neuronales como se muestra en [2]. Aquí son identificados algunos modelos de suspensión activa, estos modelos son usados para diseñar tres ecuaciones de paridad. La estimación paramétrica y las ecuaciones de paridad son usadas para la detección e identificación de fallas basados en el modelo. El trabajo se centra en suspensiones activas, las cuales por su alto consumo de energía se tornan muy costosas con lo que su uso se vuelve inviable en vehículos de serie.

En 1976 Itkis escribió el primer libro de modos deslizantes [3], posteriormente en 1977 Utkin publicó el artículo *Variable structure with sliding modes* [4]. En 1978 Clark aplicó el observador de Luenberger para la detección de fallas [5]. En 1978 Himmelblau publicó el primer libro acerca de la detección de fallas, basadas en el modelo enfocado a procesos químicos [6]

En la década de los 80's en 1985 Takagi [7] y 1998 Sugeno, comenzaron a tratar sistemas no lineales, como conjuntos de sistemas lineales [8]. En 1981 Utkin [9] y en 1987 Walcott [10] proponen observadores con modos deslizantes. Al mismo tiempo en 1987 Franck publicó un artículo en el cual trato diferentes esquemas de detección de fallas usando observadores lineales y no lineales [11].

En el año 2000, Patton [12] publicó un libro acerca de la metodología a seguir para resolver el problemas del diagnóstico de fallas desde diferentes enfoques. 2001, Tanaka [13] publicó un artículo acerca de como realizar el diseño controladores y observadores difusos usando *LMI's*. En 2006, Anzures planteó el uso de observadores dedicados para el diagnóstico de fallas así como el uso de observadores con modos deslizantes [14, 15]. En 2010, Boattour publicó la formulación de la detección de fallas mediante el diseño de observadores robustos [16].

En [17], se presentan un método basado en la transformada Wavelet continua para diagnosticar fallas en un amortiguador. El método analiza la frecuencia natural del sistema y los componentes de frecuencia de la señal con la energía máxima relativa.

En [18], Yu-mei analiza la relación de ambigüedad entre los síntomas de la falla y la razón de la falla por medio de lógica difusa. Para ello se forman reglas difusas de diagnóstico de fallas, y se establece un modelo matemático difuso de diagnóstico de fallas difuso. Finalmente, por medio una matriz difusa de diagnóstico de fallas se logra relacionar los síntomas con las causas.

En [19], Lozoya-Santos proponen un sistema de detección de fallas para monitorear el rendimiento del amortiguador, para eso estiman la frecuencia para la carretera basado en la deflexión de la suspensión. La propuesta controla la transmisibilidad de la suspensión en función de la frecuencia de la carretera, para mejorar la eficiencia del sistema de detección, realizan un cambio de dominio observable. Este interruptor identifica el dominio de transmisión más sensible mejorando la eficiencia de la propuesta. Las pruebas intensivas generadas al azar con menos del 36 % de error de detección promedio utilizando un amortiguador *MR* semi-activo valida la transmisibilidad como un buen indicador de la condición del amortiguador *MR*.

En [20], Rizvi, utilizan el modelo de una suspensión activa del modelo completo del vehículo para diagnosticar fallas en los actuadores. Además, desarrollan un enfoque basado en observadores de entradas desconocidas (Unknown Input Observer) para desacoplar el sistema de las perturbaciones de la carretera y así el residuo generado tan sólo sea sensible a las fallas. Se hace el uso de un banco de observadores para diseñar un esquema de aislamiento de fallas, para aislar el actuador o los actuadores en falla. Pero no se toma en cuenta la dinámica de la fuerza del actuador.

En [21], Odendaal realiza un diagnóstico fallas en el actuador de un avión por medio de un enfoque optimizado de espacios de paridad. El espacio de paridad abarca todas las relaciones que cuantifican las redundancias analíticas disponibles entre las salidas de los sensores y las entradas de los actuadores del sistema. Una matriz de transformación es luego optimizada para transformar esas relaciones de paridad en residuos que son sensibles a fallas específicas del actuador.

En [22], Hernández-Alcantara, proponen el diseño de un observador de Luenberger para estimar la velocidad, tanto de la masa suspendida como la de la masa no suspendida; todo a partir de un sistema desacoplado de la perturbación introducida por el perfil de

carretera. Sin embargo al desacoplar el sistema se introducen problemas de observabilidad.

En [23], Morales-Menendez, presentan una aplicación de detección de fallas combinado con un controlador Sky-Hook principalmente orientado a detectar fallas en sensores y actuadores. El esquema de detección de fallas se basa el enfoque de espacio de paridad, ya que la no linealidad del sistema se encuentra sólo en las matrices de entrada B y D. Se propone considerar las no linealidades fuera de las matrices, directamente dentro de la entrada de control, quedando así un sistema lineal invariante en el tiempo. El banco de pruebas experimentales usa hardware en el lazo (HiL) para validar este enfoque. Las pruebas concluyen con una eficiente detección de las fallas y bajo costo computacional.

En [24], Hernandez-Alcantara, realizan una comparación entre el desempeño de un observador de entradas desconocidas y un sistema de identificación paramétrica por mínimos cuadrados con factor de olvido para estimar fallas en el actuador de una suspensión semi-activa con amortiguador MR.

En ese sentido, se desea diseñar un algoritmo de diagnóstico de fallas para la suspensión de un vehículo con amortiguador capaz de responder rápida, precisa y eficientemente.

1.2. Objetivo general

El presente trabajo tiene como objetivo general diseñar un sistema de diagnóstico de fallas para el sistema de 1/4 de suspensión de automóvil de un vehículo terrestre, empleando el método de redundancia analítica basado en modelo, por medio del uso de observadores de Luenberger y observadores de Luenberger de modos deslizantes.

1.2.1. Objetivos específicos

- Estudiar el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico del sistema de suspensión de un vehículo y los métodos de detección y diagnóstico de fallas que se emplean para este sistema.
- Diseñar un observador de Luenberger para fines de detección de fallas en una suspensión.
- Implementar la metodología al diagnóstico de fallas en sensores basado en observadores de modos deslizantes.
- Ofrecer de manera didáctica una variedad de observadores de estado para su análisis y evaluar así su desempeño en el diagnóstico de fallas.

1.3. Hipótesis

Mediante observadores de Luenberger y modos deslizantes es posible diseñar un generador de residuos para detectar fallas en el sistema de 1/4 de suspensión de automóvil.

1.4. Justificación

Una de los principales retos en la actualidad es trabajar con sistemas no lineales, con múltiples entradas y/o salidas, variantes o invariantes en el tiempo.

Este trabajo se enfoca en análisis de un sistema de 1/4 suspensión de automóvil llevado a su representación a espacio de estado, obteniendo una aproximación lineal del modelo y usar técnicas de teoría de control enfocados a resolver el problema del diagnóstico de fallas, con lo que se pretende comprobar la robustez de los observadores de Luenberger y de modos deslizantes, cabe mencionar que los observadores con modos deslizantes ofrecen mayor robustez al sistema.

1.5. Metodología

A continuación se describe el procedimiento realizado para el desarrollo del presente trabajo de tesis.

- Revisión de la literatura relacionada con el problema sujeto a estudio: En esta etapa se realiza la revisión de las diferentes técnicas desarrolladas, en los últimos años, sobre el diagnóstico de fallas basadas en el Modelo, principalmente la que emplean el diseño de observadores.
- Planteamiento matemático del problema: En esta etapa se establece el modelo matemático que describe la dinámica del Sistema del caso de estudio.
- Establecer una propuesta para la solución del problema: en esta fase se proponen los observadores que serán utilizados.
- Desarrollo de la propuesta: se realiza el diseño y las simulaciones de los observadores de estado para el diagnóstico de fallas.
- La implementación de los observadores: llevar el desarrollo de los diferentes esquemas de observadores para el sistema de suspensión de un 1/4 de vehículo.
- Discusión de los resultados: se analizan los resultados que se obtuvieron en las simulaciones.

1.6. Contenido de la Tesis

La presente tesis tiene la siguiente estructura:

Capítulo 1. Introducción. En este capítulo se realiza una recopilación de antecedentes

relacionados con el diagnóstico de fallas y observadores robustos, se anuncian trabajos realizados anteriormente, así como los objetivos, metodología, hipótesis y justificación de este trabajo de tesis.

Capítulo 2. El diagnóstico de fallas.

En este capítulo se presenta todo lo relacionado con el diagnóstico de fallas en sistemas dinámicos, los tipos de fallas que se presentan, la detección de fallas y algunos métodos utilizados para el diagnóstico de fallas.

Capítulo 3. El diseño de observadores.

En este capítulo se describen los fundamentos teóricos sobre el diseño de observadores para la detección de fallas, principalmente el desarrollo del observador de Luenberger y el observador de Luenberger de modos deslizantes.

Capítulo 4. Caso de estudio.

En este capítulo se describe el sistema o caso de estudio, su modelo matemático, así como los estados considerados para el diseño. Asimismo se describen las pruebas realizadas con los observadores presentados, se discuten las respuestas del sistema en presencia de fallas, mostrando los resultados que fueron obtenidos en las simulaciones.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones.

En este capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo en base a los resultados obtenidos en las simulaciones.

En la última parte se presenta una sección para la bibliografía donde se incluye información adicional que puede ser de ayuda al lector y donde puede encontrar mas información sobre este tema.

Capítulo 2

Diagnóstico de fallas

En esta sección se considerará el diseño de sistemas de control con observadores cuando los sistemas tienen entradas de referencia. La salida del sistema de control debe seguir a la entrada que es variable en el tiempo. En el seguimiento de la entrada, el sistema debe mostrar un comportamiento satisfactorio un tiempo de subida, sobre-elongación y tiempo de asentamiento razonables.

Un observador de estado es un sistema dinámico que estima variables de estado o parámetros a partir de mediciones disponibles. En la actualidad los observadores, también llamados sensores virtuales, son ampliamente utilizados debido a que permiten estimar variables difíciles de medir de un sistema a partir de algoritmos matemáticos y mediciones disponibles, además son adecuados para detectar y localizar fallas en actuadores y sensores. Los observadores tienen un procedimiento de diseño sistemático y sencillo, lo que facilita su implementación y ejecución en tiempo real.

2.1. Diagnóstico de fallas basado en observadores

Los inicios del diagnóstico de fallas basados en el modelo surgen como una aplicación de la teoría de los observadores utilizados en el área de control automático. Aunque la automatización de los sistemas permite reducir la exposición de los operadores humanos al manejo manual, tareas repetitivas y ambientes inseguros, no garantiza la prevención de eventos de falla en los procesos. La naturaleza física de los sistemas hace que éstos sean vulnerables a fallas en sus componentes, lo cual está asociado a efectos no deseados en los mismos, ya que se puede presentar desde la reducción del desempeño hasta la interrupción total de la actividad. Es importante mencionar que en ocasiones el inicio de una falla no se manifiesta de manera rotunda en el funcionamiento del sistema; sin embargo, la operación prolongada bajo esta situación provoca que la falla se intensifique y por lo tanto el efecto sobre el proceso sea mayor.

A partir de una secuencia de entradas y salidas obtenidas de los sensores en el proceso, el objetivo de la detección de fallas es verificar la consistencia con el comportamiento

del modelo, de esta manera la detección de una inconsistencia es un indicativo de la presencia de una falla en el sistema. Una forma de verificar dicha consistencia entre el modelo y las mediciones entrada-salida (u, y) es generar una estimación de las salidas (\hat{y}) . La consistencia entre el sistema real y el modelo se evalúa a cada instante de tiempo mediante la diferencia

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (2.1)$$

conocida como *residuo*. Idealmente, en un sistema libre de fallas, el valor absoluto del residuo $r(t)$ debe estar suficientemente cerca de cero y naturalmente desviarse de cero cuando una falla $d(t)$ ocurre en el sistema; de esta forma, se usa esta propiedad del residuo para determinar si se presenta o no una falla en el sistema, es decir, se cumple la siguiente condición:

$$si \quad |r(t)| \in Zero \quad no\ hay\ falla\ (d(t) = 0) \quad (2.2)$$

$$si \quad |r(t)| \in No\ Zero \quad falla\ (d(t) \neq 0) \quad (2.3)$$

Por lo tanto, se puede decir que los residuos son sensibles a fallas específicas. En este sentido una propiedad deseable es que el residuo sea insensible o poco sensible a variaciones paramétricas en una vecindad de valores nominales; es decir, las variaciones paramétricas no deben ser confundidas con fallas, los residuos deben ser robustos ante dicho efectos. Dicha robustez en la detección de fallas se puede lograr en la generación de residuos o en la fase de toma de decisión. De esta manera, la idea generalmente aceptada para el diagnóstico de fallas es que se puede dividir dos etapas básicas usando una estructura como se muestra en la figura 2.1, y se describen a continuación:

- Generación de residuos. Su propósito es generar la señal de diagnóstico conocida como residuo, la cual sólo depende de las fallas y no de la entrada.
- Toma de decisión. El propósito de esta etapa, también conocida como evaluación de residuo, es examinar el residuo y extraer información sobre las fallas.

Como se ilustra en la figura 2.1 el problema esencial en el diagnóstico de fallas basado en el modelo es la generación de residuos, puesto que si el algoritmo para generar la señal de diagnóstico no está diseñado correctamente se puede perder información importante sobre las fallas. Esto ha motivado al estudio y propuestas de diferentes métodos para la generación de residuos, entre los cuales se pueden mencionar: filtros de Kalman, espacios de paridad, estimación de parámetros, observadores de Luenberger, observadores de modos deslizantes, entre otros.

2.2. Observador de Luenberger

Los observadores son llamados sensores virtuales debido a que su algoritmo de programación tiende a realizar la misma función que un sensor físico. Sin embargo, el diseño de un observador implica que el sistema sea observable [30].



Figura 2.1: Estructura general del sistema de diagnóstico de fallas

Teorema 1 *Dado el sistema descrito por la ecuación 2.6 y 2.7 se dice que es observable si y sólo si*

$$\text{rango}(O) = n \quad (2.4)$$

donde O es conocida como la matriz de observabilidad y n representa la dimensión u orden del sistema, y esta definida por el par (A, C) , donde

$$O = \begin{bmatrix} C' & A'C' & A'^2C' & \dots & A'^{n-1}C' \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

La aproximación basada en observadores necesita de un modelo del sistema para operar de forma paralela con el proceso en lazo abierto [39], por lo cual se garantiza el conocimiento pleno del comportamiento del sistema. La diferencia entre la medición de salida y las señal estimada por el observador debe ser diferente de cero cuando un error ocurre [40].

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.6)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.7)$$

Si por restricciones físicas no tenemos acceso para medir a las variables del sistema, se pueden estimar, y para ello se recomienda construir un observador de estado, basado en mediciones de entradas y salidas, lo cual permitirá generar las señales de falla o residuos y con ello detectar fallas en el sistema.

Como se puede apreciar de la figura 2.2 se tiene:

$$y(t) - \hat{y}(t) = Cx(t) - C\hat{x}(t) = C\tilde{x}(t) \quad (2.8)$$

La ecuación para el observador se muestra en (2.9) y (2.10) :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] \quad (2.9)$$

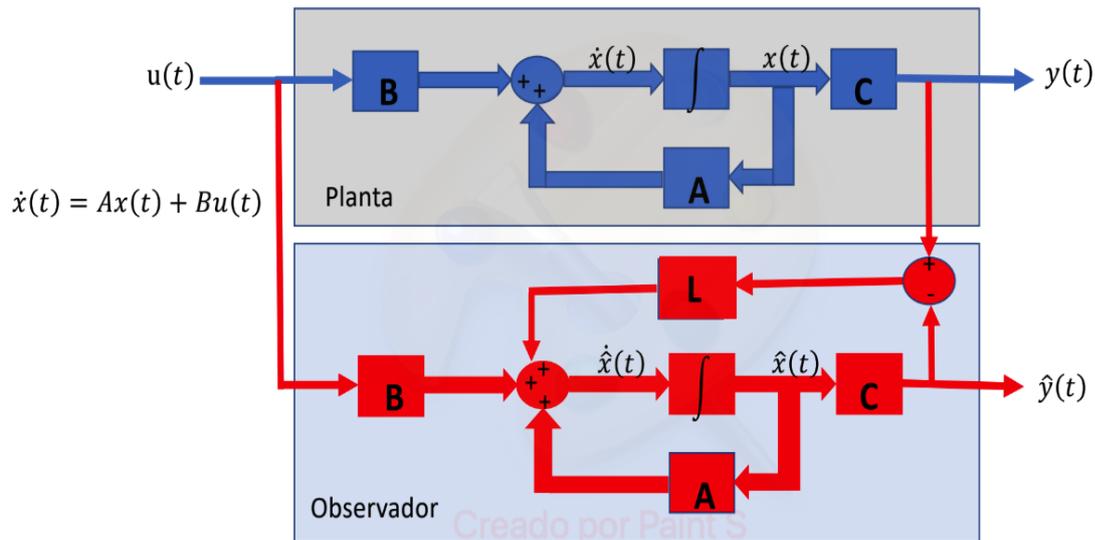


Figura 2.2: Estructura de un observador de estado

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[Cx(t) - C\hat{x}(t)] \quad (2.10)$$

El objetivo del observador es hacer que el error de estado (2.11) tienda a cero conforme t tiende a infinito, es importante conocer la dinámica del error, la cual se define como en (2.12):

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (2.11)$$

La dinámica del error se puede definir como:

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) = Ax(t) + Bu(t) - A\hat{x}(t) - Bu(t) - L[Cx(t) - C\hat{x}(t)]$$

$$\dot{e}(t) = A[x(t) - \hat{x}(t)] - LC[x(t) - \hat{x}(t)]$$

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \quad (2.12)$$

Se puede observar que:

$$e(t) \rightarrow 0 \quad \text{conforme} \quad t \rightarrow \infty$$

Si la matriz del error en lazo cerrado ($A - LC$) es Hurwitz; es decir que los valores propios tengan la parte real negativa.

Teorema 2 *L existe tal que*

$$\det(SI - A + LC) = \alpha(S) = S^n + \alpha_1 S^{n-1} + \dots + \alpha_n$$

si y sólo si el sistema es observable. Con

$$L = O^{-1}(T^{-1})^T(\alpha - a)^T \quad (2.13)$$

ó

$$L = \alpha(A)O^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Por otro lado, la estabilidad y las características de respuesta transitoria se determina mediante los valores característicos de la matriz $(A - LC)$. Si se elige la matriz L en forma adecuada, la matriz $(A - LC)$ se convierte en una matriz asintóticamente estable y para todos $e(t) \neq 0$ es posible hacer que $\dot{e}(t)$ tienda a 0 conforme t tienda a infinito [54].

El diseño del observador a través de la retroalimentación de estados observados se basa en la asignación de polos haciendo uso de (2.13) o (2.14) para encontrar la matriz de ganancias L mediante un análisis previo de observabilidad del sistema, recordando que dicha técnica se basa en la dinámica del sistema.

2.3. Observador difuso con modos deslizantes

Los sistemas de Control de estructura Variable (SCEV) tienen sus orígenes en Rusia en 1960; sin embargo, fue hasta mediados de 1970 que aparece fuera de Rusia con el libro de Itkis (1976) y el artículo de Utkin (1977) publicados en Inglés. A partir de aquí, los SCEV son utilizados en el diseño de reguladores robustos, esquemas adaptivos, sistemas de seguimiento, observadores de estado y esquemas de detección de fallas [30].

La idea ha sido aplicada satisfactoriamente a problemas diversos como: Control de vuelo, control de motores eléctricos, procesos químicos, sistemas espaciales y robots. Los SCEV, como su nombre lo indica, son una clase de sistemas donde la ley de control es cambiada deliberadamente durante el proceso de control de acuerdo a algunas reglas definidas las cuales dependen del estado del sistema.

Para precisar, sea el Observador de Luenberger definido en (2.9) agregando un término discontinuo de modos deslizantes [15] representado por (2.15).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(u) + L(y(t) - \hat{y}(t)) + \varphi(t) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (2.15)$$

donde, $\varphi(t)$ es el vector discontinuo de modos deslizantes definido por [52].

$$\varphi(t) = M_0 \text{sign}(e(t)^T P(t)) \quad (2.16)$$

de acuerdo a la definición de la función signo

$$\text{sign}(e(t)^T P(t)) = \frac{e(t)^T P(t)}{\|e(t)^T P(t)\|} \quad (2.17)$$

Para el análisis de la convergencia, el error de estimación $e(t)$ se define en (2.18).

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (2.18)$$

La dinámica del error $\dot{e}(t)$ se define en (2.19)

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \\ &= Ax(t) + Bu(t) - A\hat{x}(t) - Bu(t) - K_e(Cx(t) - C\hat{x}(t)) + \varphi(t) \\ &= A(x(t) - \hat{x}(t)) - K_e C(x(t) - \hat{x}(t)) - \varphi(t) \\ \dot{e}(t) &= (A - K_e C)e(t) + M_0 \text{sign}(e(t)^T P(t)) \end{aligned} \quad (2.19)$$

de tal modo, para que $\dot{e}(t)$ descrito por (2.19) converja, se debe cumplir que $M_0 > 0$ sea una constante positiva y que $P > 0$ satisfaga la Ecuación de Lyapunov (2.20) [53]. Es decir, para una $Q > 0$ dada, se debe encontrar una $P > 0$ simétrica que satisfaga.

$$A^T P + P A = -Q \quad (2.20)$$

Capítulo 3

Caso de estudio

El caso de estudio que se desarrolla en el presente trabajo de tesis es un sistema de suspensión de un cuarto de vehículo, el sistema de suspensión proporciona características de buen desempeño y confort en la conducción. La principal aplicación del sistema es controlar el movimiento vertical excesivo de la rueda para eliminar las fallas de contacto entre el neumático y la carretera, mantener buenas características de conducción y evitar daños a la suspensión.

3.1. Sistema de Suspensión: Fundamentos Teóricos

En 1860 cuando Jean Etienne Lenoir creó el primer motor de combustión interna quemando gas dentro de un cilindro, pero recién en 1876 Nikolaus August Otto construyó el primer motor de gasolina de la historia. Desde entonces la ciencia automovilística ha venido evolucionando constantemente. Esta evolución siempre ha centrado su interés en mejorar la seguridad y el confort de los pasajeros.

Es así como el sistema de suspensión se convierte en uno de los elementos más importantes del vehículo, ya que de él dependen los parámetros de seguridad y confort ya mencionados.

3.2. El sistema de suspensión: aspectos generales

Como ya se mencionó la función principal de un sistema de suspensión en un automóvil es absorber las vibraciones generadas por las irregularidades del terreno por el cual se desplaza, mientras mantiene los neumáticos siempre en contacto con la superficie. Existen dos variables muy importantes a tener en cuenta en un sistema de suspensión: el confort y la estabilidad.

El confort está relacionado con el aislamiento del chasis o bastidor con respecto a las imperfecciones de la superficie de rodamiento. Por su parte, la estabilidad se define por el agarre de los neumáticos con el suelo, lo cual se traduce en un alto grado de seguridad en el desplazamiento [46], [47].

El problema radica en el hecho de que ambas variables son inversamente proporcionales, es decir, que si se aumenta el confort se reduce la estabilidad del vehículo y viceversa [48], [49], [50] [51].

El sistema de suspensión, en términos generales está conformado por una serie de elementos elásticos que tiene lugar entre la masa suspendida y la masa no suspendida:

3.3. Modelado del sistema 1/4 suspensión de automóvil

El modelo de un cuarto de vehículo [45], el cual representa adecuadamente el problema del control de las variaciones de carga sobre las ruedas del vehículo y las fuerzas que intervienen en el sistema de suspensión, como se muestra en la figura 3.1, donde los resortes tienen fuerzas iniciales en posición de equilibrio: (3.1).

$$\begin{aligned} F_u &= (m_s + m_u)g \\ F_s &= (m_s)g \end{aligned} \quad (3.1)$$

Donde g representa la aceleración de la gravedad. Aplicando la segunda ley de Newton, a la masa suspendida (chasis) y no suspendida (neumático) se obtiene:

$$m_s \ddot{x}_s = F_a - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) - (-F_s + k_s (x_s - x_u)) - m_s g \quad (3.2)$$

$$m_u \ddot{x}_u = -F_a - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) + (-F_s + k_s (x_s - x_u)) - m_u g - c_u (\dot{x}_u - \dot{x}_r) - (-F_u + k_u (x_u - x_r)) \quad (3.3)$$

Simplificando las ecuaciones (3.2) y (3.3) y, considerando (3.1) se obtiene:

$$m_s \ddot{x}_s = F_a - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) - (k_s (x_s - x_u)) \quad (3.4)$$

$$m_u \ddot{x}_u = -F_a + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) + (k_s (x_s - x_u)) - c_u (\dot{x}_u - \dot{x}_r) - (k_u (x_u - x_r)) \quad (3.5)$$

Donde:
 x_r = Desplazamiento por las irregularidades del camino en metros (m).

x_u = Desplazamiento vertical de neumático en metros (m).

x_s = Desplazamiento vertical del chasis en metros (m).

F_a = Fuerza del actuador en Newton (N).

F_u y F_s = Fuerzas iniciales de los resortes en Newton(N).

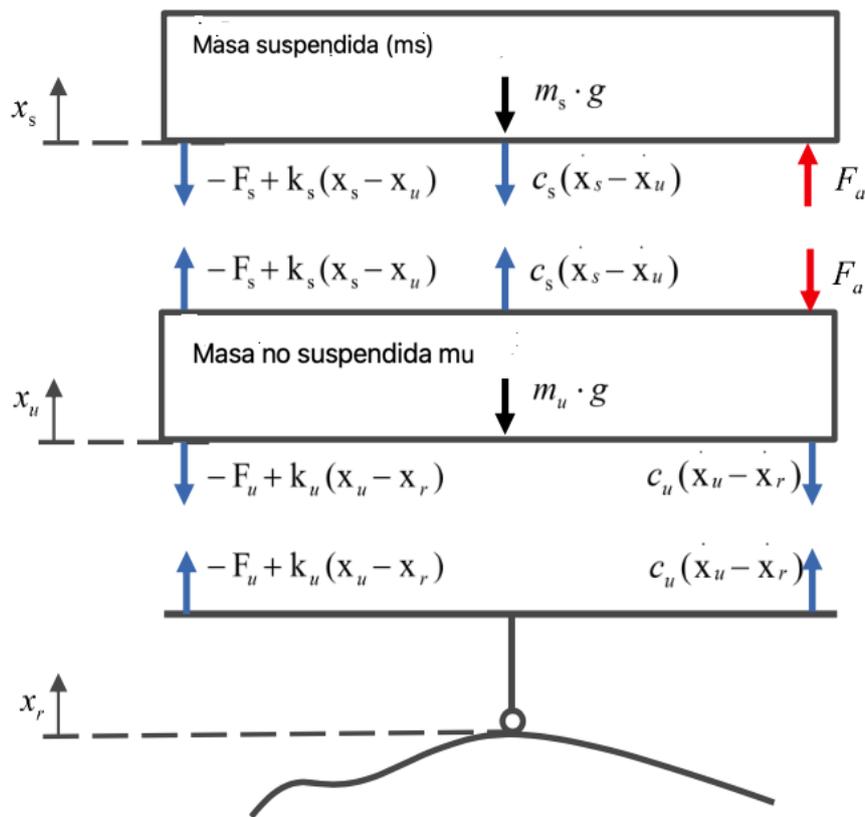


Figura 3.1: Esquema de un modelo de un cuarto de vehículo.

De esta manera, (3.4) y (3.5) representa el modelo de la masa suspendida y de la masa no suspendida, respectivamente. Estas ecuaciones describen el comportamiento de dichas masas cuando se analiza la cuarta parte de un vehículo.

3.4. Representación del sistema en ecuaciones de estado

Para determinar el sistema de ecuaciones de estado, primero se definió:

- Las variables de estado

$$x = \begin{bmatrix} x_s - x_u \\ \dot{x}_s \\ x_u - x_r \\ \dot{x}_u \end{bmatrix}$$

- Entradas

$$u = \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ F_a \end{bmatrix}$$

- Salidas

$$y = \begin{bmatrix} x_s - x_u \\ \ddot{x}_s \end{bmatrix}$$

Donde cada término: $(x_s - x_u)$ es la deflexión de la suspensión, \dot{x}_s es la velocidad vertical del chasis, $(x_u - x_r)$ es la deflexión del neumático, \dot{x}_r es la velocidad vertical del camino, \dot{x}_u es la velocidad vertical del neumático y \ddot{x}_s es la aceleración vertical del chasis.

Así el modelo en espacio de estado que representa la dinámica del sistema se puede escribir como (2.6) y (2.7):

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_u}{m_u} & -\frac{c_u + c_s}{m_u} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_s} \\ -1 & 0 \\ \frac{c_u}{m_u} & -\frac{1}{m_u} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_s} \end{bmatrix};$$

3.5. Cálculo de parámetros

Para obtener los parámetros del sistema, se realizó una simulación del modelo del sistema de suspensión en espacio de estado, utilizando los datos de la tabla 3.1, obteniendo los siguientes valores para las matrices A, B, C y D.

Valores utilizados para el sistema		
Símbolo	Valor	Unidad
$M_1(m_u)$	40	Kg
$M_2(m_s)$	250	Kg
$K_1(k_u)$	125000	N/m
$K_2(k_s)$	28000	N/m
$B_1(c_u)$	100	$N.s/m$
$B_2(c_s)$	2000	$N.s/m$

Tabla 3.1: Valores utilizados en la simulación del modelo de un cuarto de vehículo

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{28000}{40} & -\frac{2000}{40} & 0 & \frac{2000}{40} \\ \frac{250}{0} & \frac{250}{0} & 0 & \frac{250}{1} \\ \frac{28000}{40} & \frac{2000}{40} & -\frac{125000}{40} & -\frac{100+2000}{40} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -112 & -8 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 700 & 50 & -3125 & -52,5 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{250} \\ -1 & 0 \\ \frac{100}{40} & -\frac{1}{40} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0,004 \\ -1 & 0 \\ 2,5 & -0,025 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{28000}{250} & -\frac{2000}{250} & 0 & \frac{2000}{250} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -112 & -8 & 0 & 8 \end{bmatrix};$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{250} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0,004 \end{bmatrix};$$

3.5.1. Estabilidad y observabilidad

Para el diseño de los observadores es importante realizar las pruebas de estabilidad y observabilidad, mediante la matriz de observabilidad O , de (2.5), que para este caso:

$$O = [C' \ A'C' \ A'^2C' \ A^3C']$$

para que el sistema sea observable se requiere que el rango de la matriz O sea pleno. Usando la función de Matlab `obsv(A,C)`, se obtiene:

$$O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -112 & -8 & 0 & 8 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 6496 & 352 & -25000 & -372 \\ -812 & -58 & 3125 & \frac{121}{2} \\ -299824 & -14920 & 1162500 & -9150 \\ 48846 & 2677 & -\frac{378125}{2} & \frac{1187}{4} \\ -4733960 & -637964 & 28593750 & 1823339 \end{bmatrix}$$

Para la cual su rango es pleno; es decir igual al grado del sistema, 4. Por lo tanto, el sistema es observable, lo que significa que es posible diseñar un observador que permita realizar el análisis de diagnóstico de fallas, mediante la generación de una señal residual.

Para realizar el análisis de estabilidad interna del sistema, es posible investigar si la parte real de los valores propios de la matriz A es negativa, para ello se puede emplear la función de Matlab `eig(A)`, para el caso de estudio se obtiene:

$$P = \begin{bmatrix} -27,4526 + 52,8925i \\ -27,4526 - 52,8925i \\ -2,7974 + 9,5253i \\ -2,7974 - 9,5253i \end{bmatrix}$$

Como se puede observar todos los valores propios tienen parte real negativa, por lo tanto se puede afirmar que el sistema es internamente estable.

En la figura 3.2 se puede ver el diagrama desarrollado en Simulink de Matlab, para el sistema de suspensión de un cuarto de vehículo.

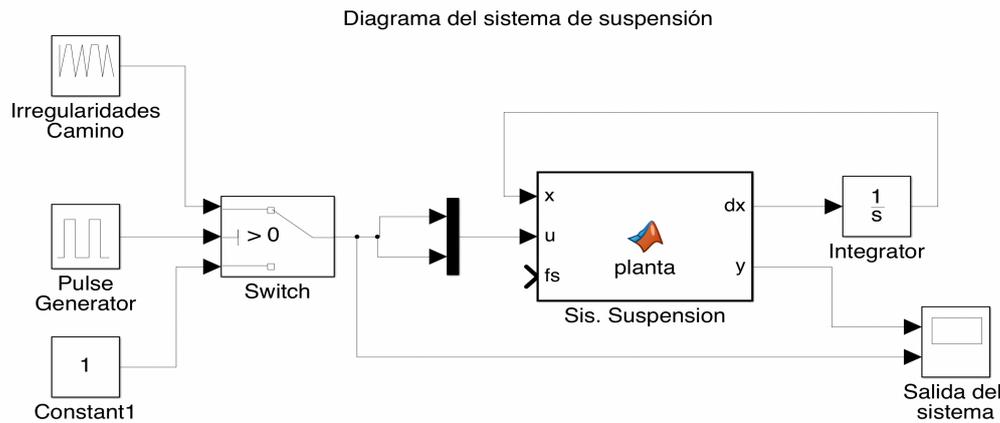


Figura 3.2: Esquema del modelo de suspensión de un cuarto de vehículo en Simulink de Matlab.

En la figura 3.3 se puede apreciar la señal de entrada $u(t)$, que simula las irregularidades del suelo.

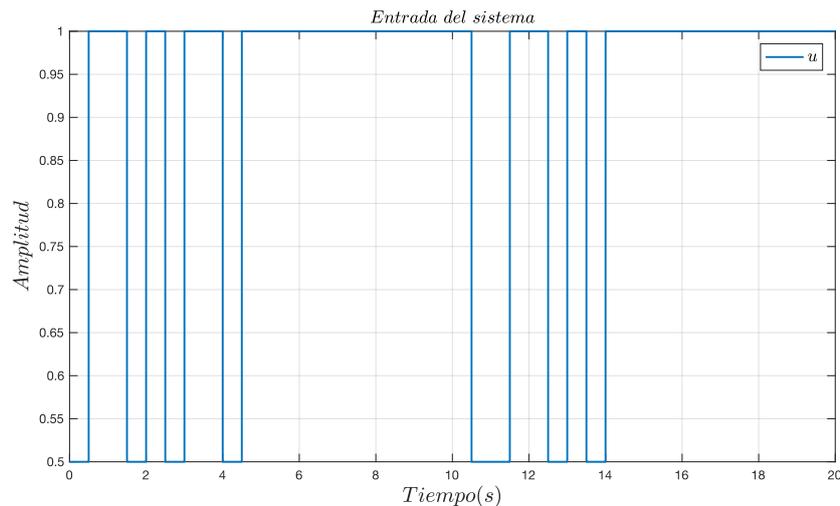


Figura 3.3: Señal de entrada al sistema de suspensión $u(t)$

En la figura 3.4 se puede observar el comportamiento del sistema ante la entrada $u(t)$.

3.6. Diseño del observadores para el diagnóstico de fallas

En esta sección se aplican los fundamentos teóricos mencionados en el Capítulo 3 donde fue realizado el análisis para el diseño de los observadores de Luenberger mostrando los resultados del diseño de los observadores.

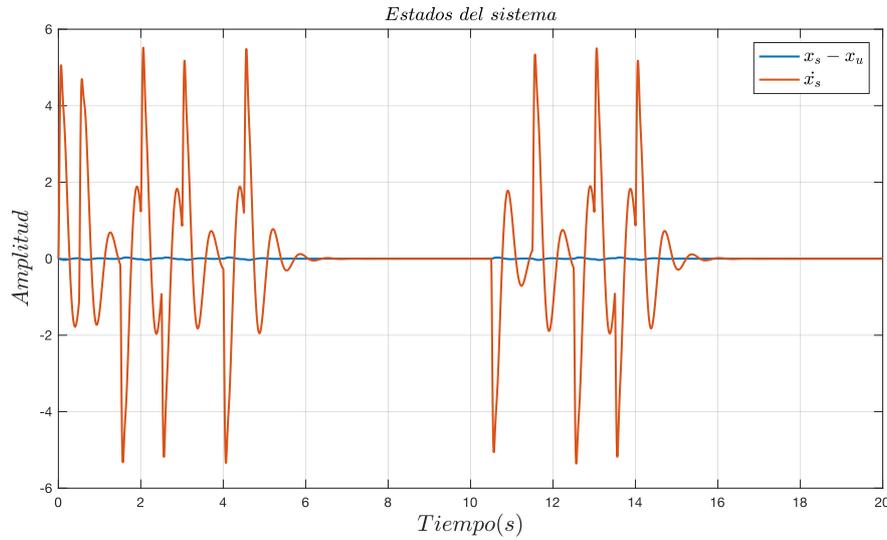


Figura 3.4: Salidas del sistemas ante una entrada $u(t)$

3.6.1. Observador de Luenberger

Como ya se mencionó en un caso real los estados del sistema no son accesibles, pero se puede realizar una estimación de los estados, de ahí el nombre de observador de estados. Un observador de estado estima las variables de estado con base en las mediciones de las variables de salida; a continuación se presenta el diseño de observador de Luenberger para la estimación de estados.

Diseño del observador mediante asignación de polos

Una de las técnica que pueden ser empleadas para el diseño de observadores de estado es la llamada **técnica de asignación de polos** haciendo uso de (2.13) o (2.14) para encontrar la matriz de ganancias \mathbf{L} , después de un análisis previo de observabilidad, que para nuestro caso se determinó que el sistema de estudio es observable.

Para el diseño del observador se consideró tomar como base de referencia los polos del sistema en lazo abierto, de tal forma que para la asignación de lo polos del observador se consideró que fuesen de 2 a 5 veces más alejados del eje imaginario en la región de estabilidad, en este caso una primera propuesta se indica en (3.6), con lo cual las ganancias L para el observador de Luenberger son las mostradas en (3.7).

$$P_{obs} = \begin{bmatrix} -180 \\ -120 \\ -12 \\ -8 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$L = \begin{bmatrix} 46,6 & -0,2 \\ 1377,6 & -3,0 \\ 169,3 & -0,4 \\ 595,4 & 20,2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Diseño del observador mediante Lyapunov

Una técnica óptima para el diseño de observadores es mediante el uso de herramientas de estabilidad de Lyapunov, para lo cual se propone un función candidata de Lyapunov, definida positiva (3.9), conocida como función cuadrática del error, partiendo de la ecuación de la dinámica del error (2.12), hacemos un cambio de variable, $(A - LC)$ por \bar{A} , entonces el error:

$$\dot{e}(t) = \bar{A}e(t) \quad (3.8)$$

Para que $e(t)$ sea asintóticamente estable se requiere que \bar{A} sea Hurwitz (los valores propios tengan parte real negativa). Lo cual se cumple si se satisface (3.9).

$$\nu(e) = e^T(t)Pe(t) > 0 \quad (3.9)$$

Donde $P = P^T > 0$; es decir, P es simétrica y definida positiva. y que su derivada es definida negativa, es decir, $\dot{\nu} < 0$.

Desarrollando:

$$\dot{\nu}(e) = \dot{e}^T(t)Pe(t) + e^T(t)P\dot{e}(t) \quad (3.10)$$

Usando (3.8),

$$\begin{aligned} \dot{\nu}(e) &= (\bar{A}e(t))^T Pe(t) + e^T(t)P\bar{A}e(t) \\ &= e^T(t)\bar{A}^T Pe(t) + e^T(t)P\bar{A}e(t) \\ \dot{\nu}(e) &= e^T(t) [\bar{A}^T P + P\bar{A}] e(t) \end{aligned} \quad (3.11)$$

El término $(e^T(t)e(t))$ es un término cuadrado, por lo que el producto siempre es positivo, por lo tanto, para que $\dot{\nu}(e) < 0$ se requiere que (3.12) se satisfaga, a esto se le conoce también como una Desigualdad Lineal Matricial, o por sus siglas en inglés LMI (Linear Matrix Inequalities).

$$[\bar{A}^T P + P\bar{A}] < 0 \quad (3.12)$$

sustituyendo $\bar{A} = A - LC$

$$\begin{aligned}
(A - LC)^T P + P(A - LC) &< 0 \\
[A^T - (LC)^T] P + PA - PLC &< 0 \\
A^T P - C^T L^T P + PA - PLC &< 0 \\
A^T P + PA - C^T L^T P - PLC &< 0
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Para resolver la desigualdad como una LMI se requiere que cada término de (3.13) tenga sólo una incógnita. En este caso se tienen dos incógnitas en dos términos, es decir P y L , entonces se propone el siguiente cambio de variable:

$$N = PL \quad \text{tal} \quad \text{que} \quad L = P^{-1}N \tag{3.14}$$

Recordando que $P = P^T$ puesto que:

$$N = PL \implies N^T = (PL)^T = L^L P^T = L^T P \tag{3.15}$$

De esta manera las LMIs a resolver serán

$$A^T P + PA - C^T N^T - NC < 0 \tag{3.16}$$

$$P > 0 \tag{3.17}$$

Lo cual nos da como resultado a P y N , y entonces las ganancias para el observador se pueden obtener usando (3.14).

Lo cual garantiza la estabilidad del observador. Para resolver la LMI son apoyamos del Software de Matlab para resolver Desigualdades Lineales Matriciales, la cual no da como resultado que P es:

$$P = \begin{bmatrix} 1,5041 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,5041 & -0,5010 & -0,5012 \\ 0 & -0,5010 & 1,5053 & 0,0002 \\ 0 & -0,5012 & 0,0002 & 0,5017 \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

y la matriz N :

$$N = \begin{bmatrix} -40,034 & -0,72832 \\ -8,4309 & 7,6443 \\ -21929 & -392,1 \\ -9,1259 & -6,9608 \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

entonces la matriz L :

$$L = P^{-1}N = \begin{bmatrix} -26,615 & -0,4842 \\ -8740 & -155,07 \\ -17476 & -312,07 \\ -8741,4 & -168,65 \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

En la figura 3.5 se muestra el diagrama de sistema del sistema junto con el observador,

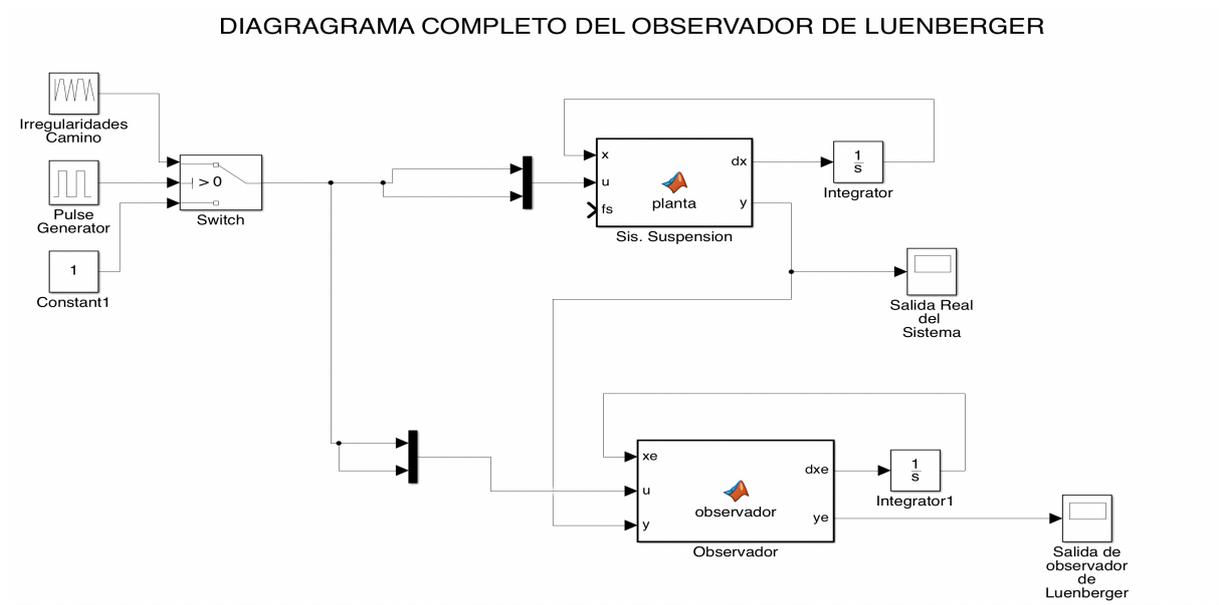


Figura 3.5: Diagrama del observador de Luenberger.

En las figuras 3.6 y 3.7 se hace una comparación entre la salida de la planta y la salida estimada del observador. Para esta simulación el sistema esta libre de fallas.

3.6.2. Observador de Luenberger con modos deslizantes

Una variante del observador de Luenberger es el observador con modos deslizantes, el cual se modifica en su diseño agregando un término discontinuo de modos deslizante ($\varphi(t)$) a la ecuación del observador como se describe en la ecuación (2.15), donde: $\varphi(t)$ es el vector discontinuo de modos deslizantes definido por [52].

$$\varphi(t) = M_0 \text{sign}(e(t)^T P)$$

Para el análisis de la convergencia, el error de estimación $e(t)$ se define en 2.18.

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$$

La dinámica del error $\dot{e}(t)$

$$\dot{e}(t) = (A - K_e C)e(t) + M_0 \text{sign}(e(t)^T P)$$

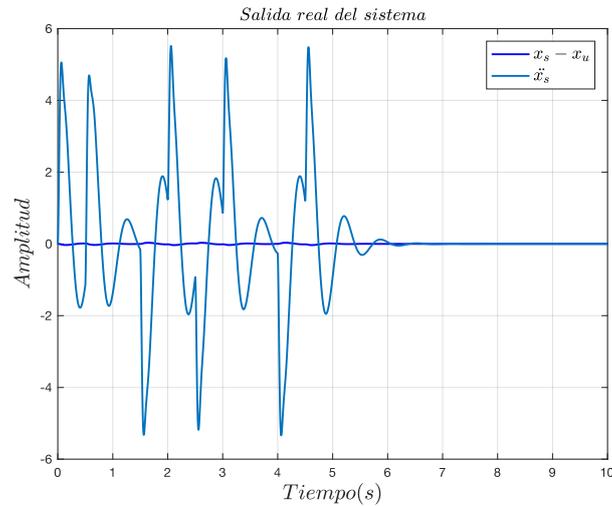


Figura 3.6: Salida real del sistemas ante una entrada $u(t)$

Para nuestro sistema se tomó una constante $M_o = 0,5$ y P es la matriz que se cálculo en la sección anterior a de través de Lyapunov 3.18.

En la figura 3.8 se muestra el diagrama del observador de Luenberger de modos deslizantes con los parámetros definidos anteriormente,

3.7. Diagnóstico de fallas

En esta sección se presenta los resultados obtenidos mediante el diagnóstico de fallas usando el Observador de Luenberger y el Observador de Luenberger con modos deslizantes.

3.7.1. Observador de Luenberger

En la figura 3.9 se muestra el diagrama del Observador de Luenberger que se utilizó para el diagnóstico de fallas del sistema bajo prueba, primero se establece un umbral para la señal del residuo, el tiempo de simulación fue de 30s en tres escenarios, los escenarios se describen a continuación.

1.- Sistema libre de fallas: El comportamiento de los residuos cuando el sistema se encuentra libre de fallas se muestra en la figura 3.10.

Se observa que no hay presencia de residuos, como se esperaba, lo que indica la ausencia de falla en el sistema.

2.- Sistema con fallas: La segunda prueba consiste en agregar una falla abrupta mediante una entrada externa de tipo ruido en el sensor 2 en el segundo 10.

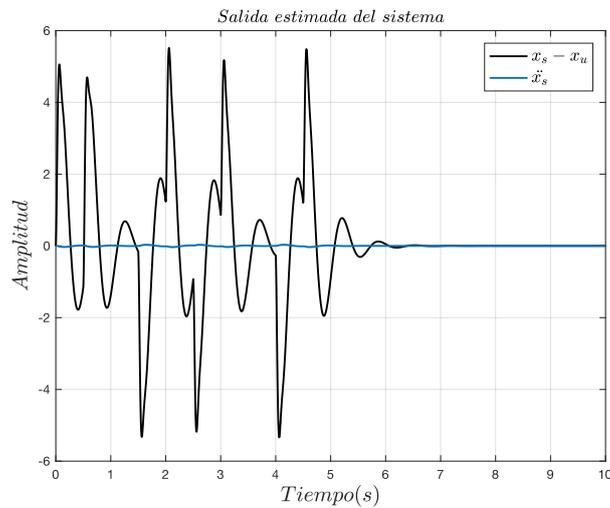


Figura 3.7: Salida estimada del sistemas ante una entrada $u(t)$

DIAGRAMA COMPLETO DEL OBSERVADOR DE LUENBERGER CON MODOS DESLIZANTES

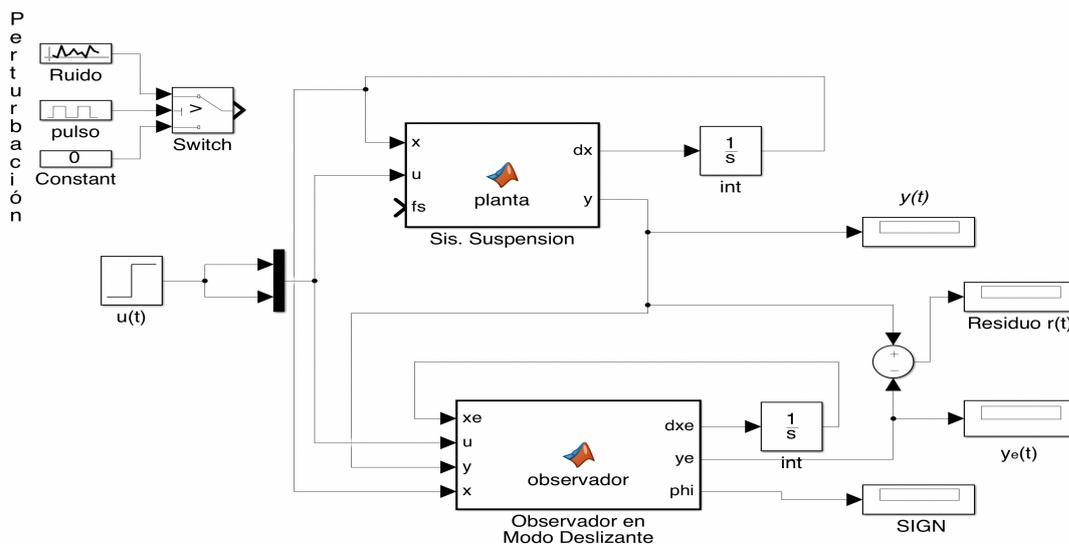


Figura 3.8: Diagrama de Observador de Luenberger de Modos Deslizantes.

En la figura 3.11 podemos apreciar que el residuo sobrepasa el umbral permitido por lo tanto podemos suponer que la falla que aparece es provocado por el sensor 2.

El residuo en el sensor 1 se puede observar en la figura 3.11, aunque se aprecia un valor diferente de cero no sobrepasar el umbral permitido.

3.- Finalmente la prueba tres, consiste en provocar dos fallas de manera simultanea, es decir, la medición de los sensores presentan errores en la lectura, al igual que las simulaciones anteriores se observara el comportamiento de residuo, a partir del segundo 10s.

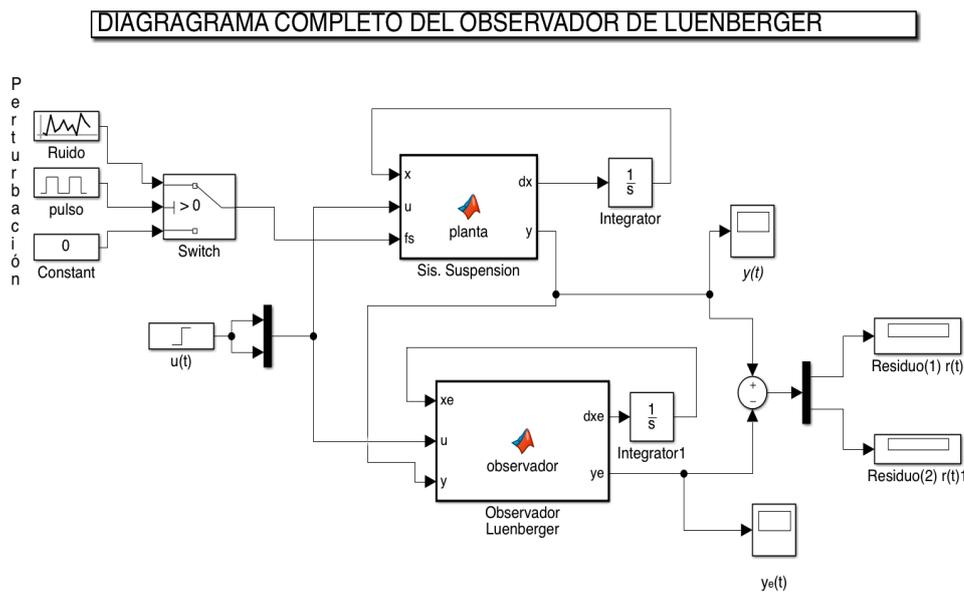


Figura 3.9: Esquema del observador de Luenberger.

En la figura 3.12 se presenta la comparación de los residuos con el umbral permitido.

3.7.2. Observador de Luenberger con modos deslizantes

En esta tesis se considera el diseño de un observadores con modos deslizantes para la generación de residuos, con el propósito de comparar dos técnicas posibles, bajo las mismas condiciones que el caso anterior, se considera cuando las mediciones de los sensores son abruptamente interrumpidas debido a una falla.

En la figura 3.13 se puede ver el diagrama de un observador con modos deslizantes, los parámetros para el observador se definieron en la sección de diseño de observador, para el diagnóstico de fallas al igual que en la sección anterior primero se estableció un umbral para la señal del residuo y el tiempo de simulación fue de 30 seg. para los mismos tres escenarios.

En el primer escenario, **sistema libre de fallas**. La figura 3.14 muestra el comportamiento de los residuos de la prueba durante un tiempo de 30seg, donde se aprecia que estos se mantienen sin cambio, aproximadamente *cero*; lo que indica la ausencia de falla.

En el segundo escenario, **falla en el sensor 2**, el sistema se encuentra trabajando normalmente hasta que se provoca una falla abrupta en el sensor 2 en el segundo 10. La figura 3.15 muestra que al igual que con el Observador de Luenberger, el residuo 1 es diferente de cero; sin embargo, no alcanza a sobrepasar el umbral, a diferencia del residuo 2 que esta sobrepasa el umbral, lo que significa que hay una falla en el sensor 2.

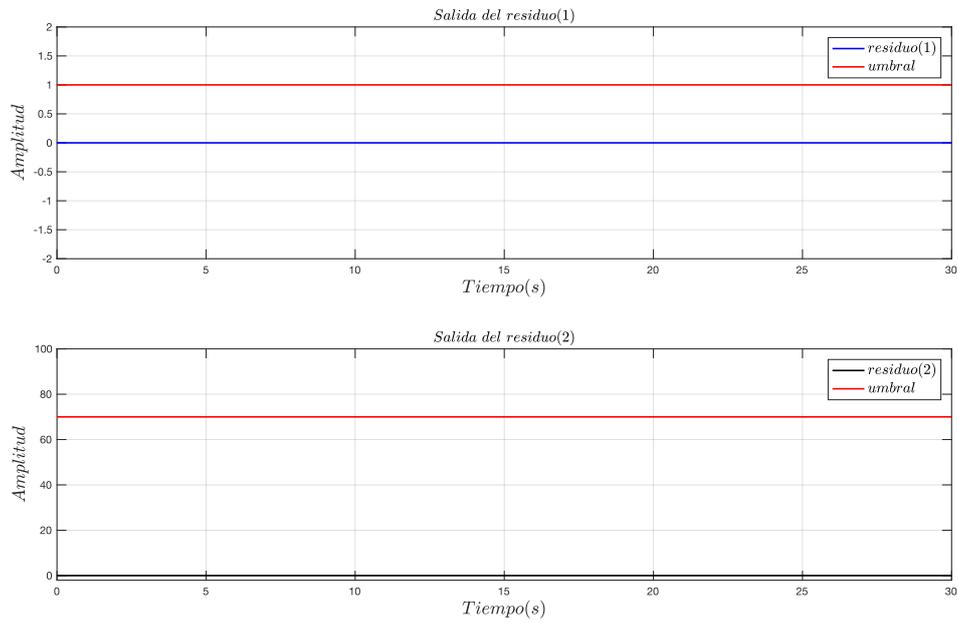


Figura 3.10: Comportamiento del residuo para un sistema libre de fallas.

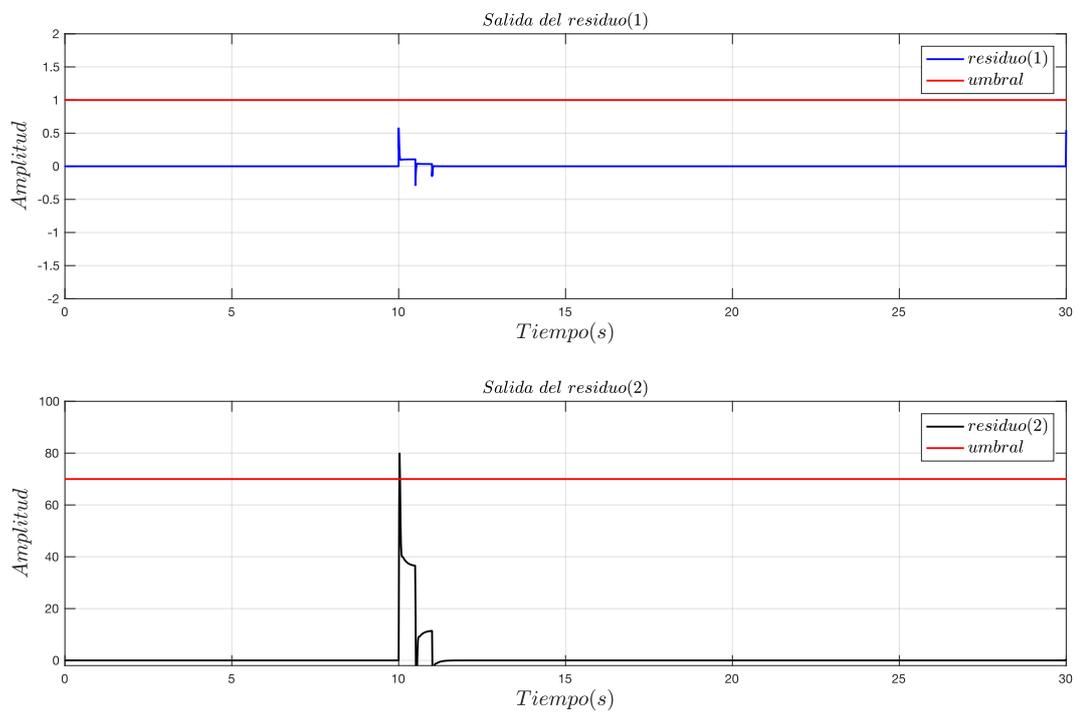


Figura 3.11: Comportamiento del residuo 1 y 2 ante una falla.

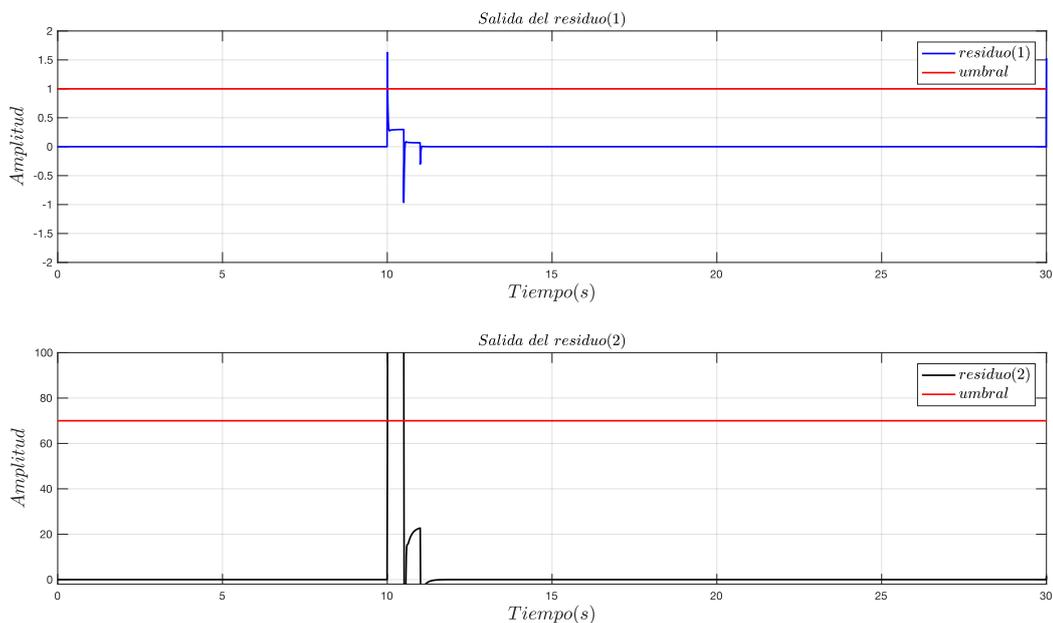


Figura 3.12: Comportamiento de residuo 1 y 2 ante la presencia de dos fallas.

DIAGRAMA COMPLETO DEL OBSERVADOR DE LUENBERGER
CON MODOS DESLIZANTES

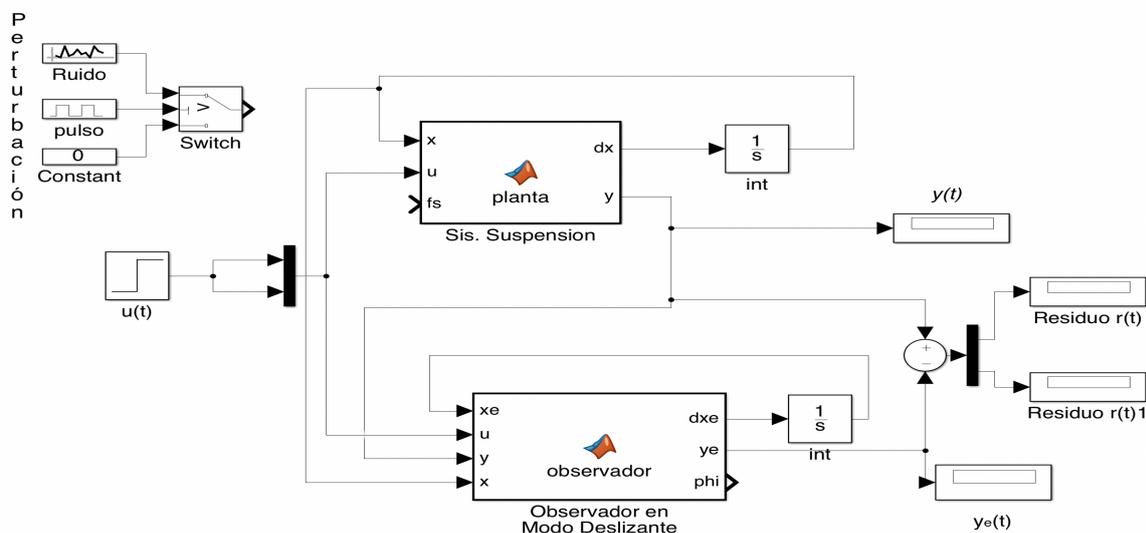


Figura 3.13: Esquema del observador de modos deslizantes.

Para el tercer escenario, **Fallas múltiples**, se simulan fallas en el sistema para ambos sensores de manera simultánea, consiste en provocar dos fallas de manera simultánea, es decir la medición de los sensores aparentan fallas en las lecturas, al igual que las simulaciones anteriores se observa el comportamiento de residuo diferente de cero, a partir del segundo 10.

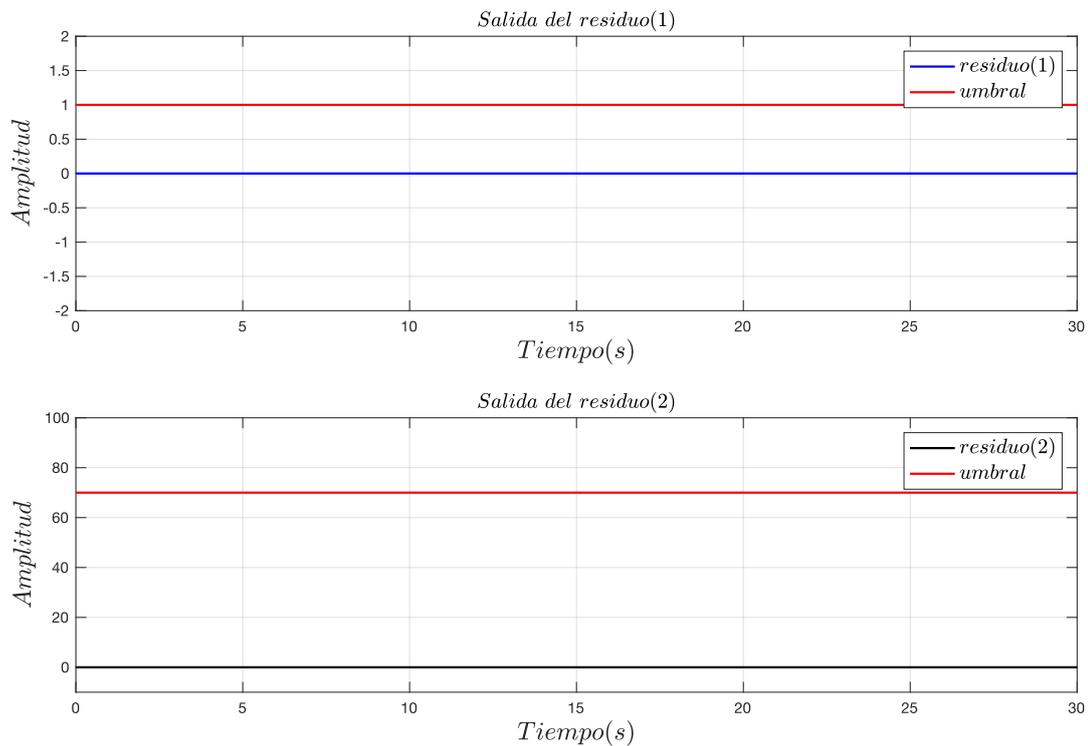


Figura 3.14: Comportamiento de residuo 1 y 2 para un sistema libre de fallas.

Variación en los parámetros del sistema.

Como se mencionó anteriormente, la parte principal en el método de diagnóstico de fallas basadas en el modelo es precisamente el proceso de generación de residuos, puesto que, tanto las fallas e incertidumbres como la variación de parámetros afectan a la señal residual y el aislamiento no es una tarea sencilla.

La tarea en el diseño de un esquema robusto para la detección de fallas es generar residuos insensibles a la variación de parámetros y al mismo tiempo sensibles a las fallas [30], [31], [32].

En la figura 3.18 se muestra el comportamiento de los residuos del sistema como resultado de una variación de parámetros de la planta. Las modificaciones de los parámetros se efectuaron mediante la alteración o cambio de los valores de las matrices A y B en la ecuación. Se observa que los residuos tienen pequeños cambios, cuyo comportamiento es similar al mostrado en la figura 3.16, es decir, los Observadores con Modos Deslizantes desde este punto de vista son robustos ante una variación en los parámetros a diferencia que un Observador de Luenberger.

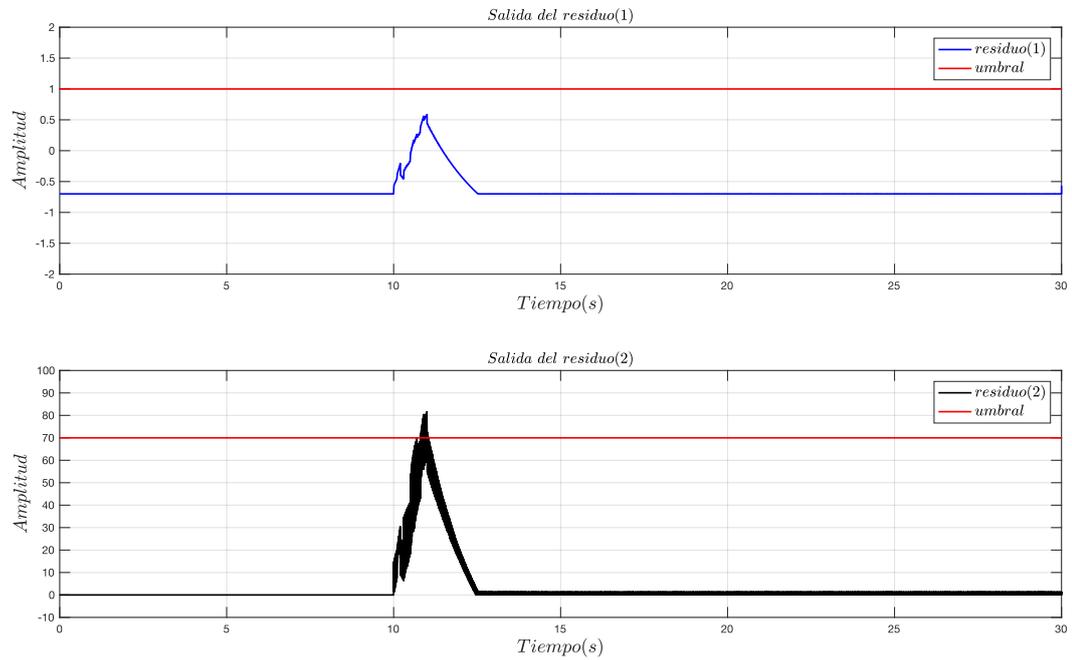


Figura 3.15: Comportamiento de residuo 1 y 2 ante la presencia una falla en el sensor 2.

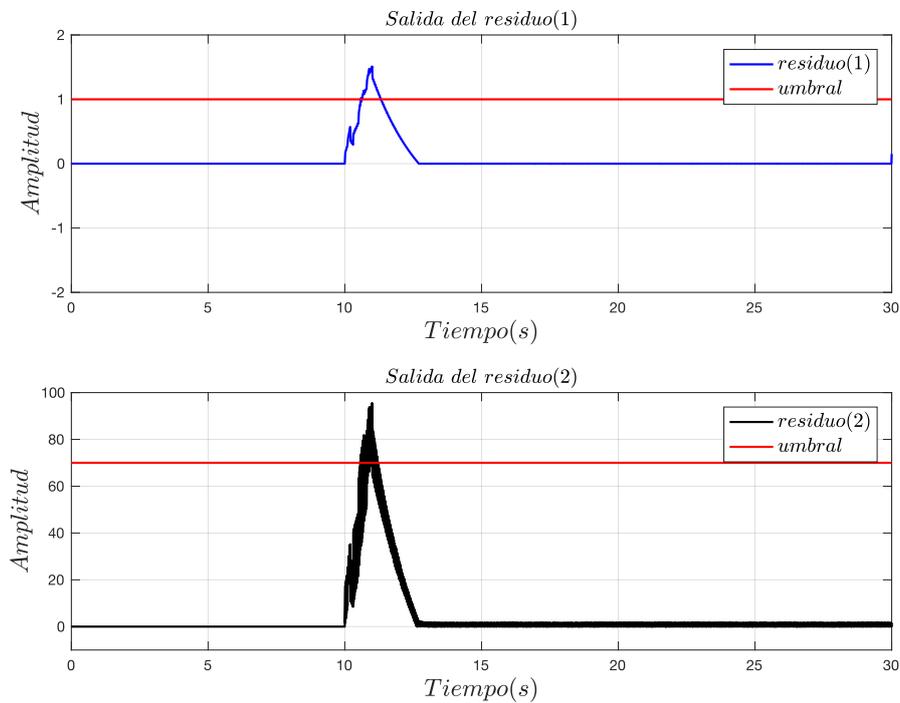


Figura 3.16: Comportamiento de residuo 1 y 2 ante la presencia de una falla múltiple.

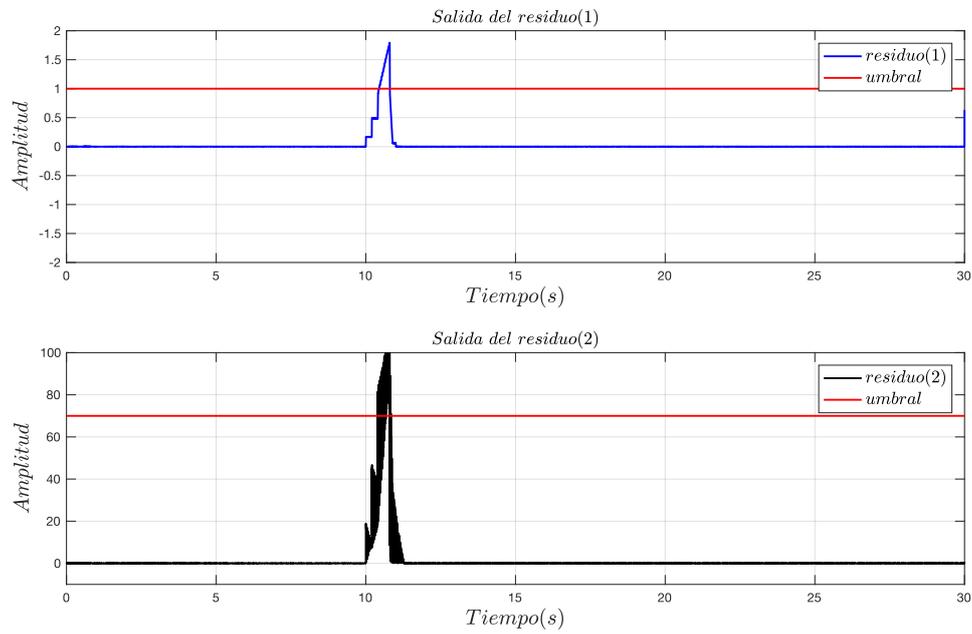


Figura 3.17: Comportamiento de residuo ante un cambio en los parámetros, observador de modos deslizantes.

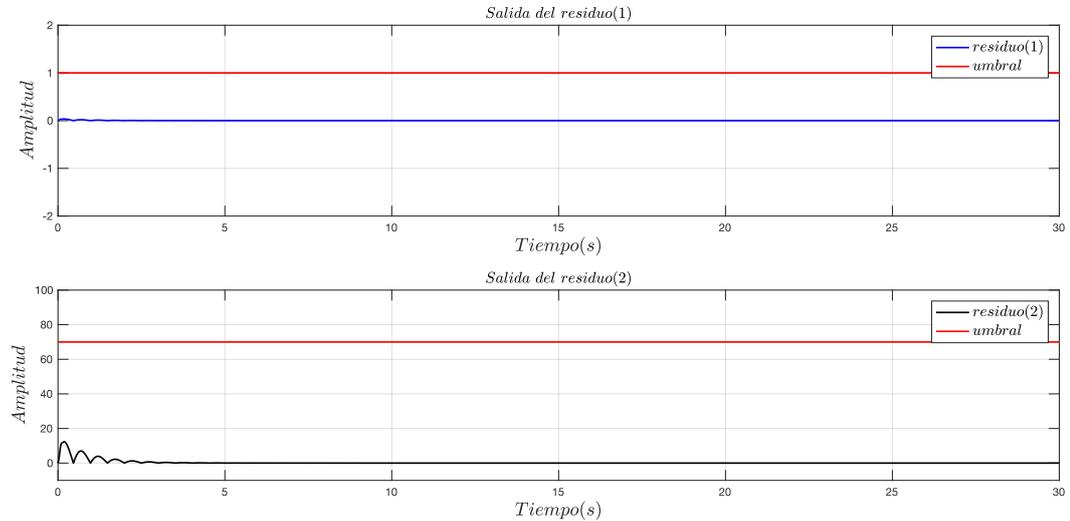


Figura 3.18: Comportamiento de residuo ante un cambio en los parámetros, observador de Luenberger.

Capítulo 4

Conclusiones

En el campo del diagnóstico de fallas es importante tener en cuenta que cualquier sistema esta propenso a sufrir fallas de cualquier tipo, siendo las fallas en los sensores una de las más comunes en sistemas dinámicos. Todo esto da lugar al trabajo y desarrollo de metodologías que resuelvan dicha problemática.

En base al desarrollo de la presente tesis, podemos observar que el problema del diagnóstico de fallas aún esta abierto, la técnica o herramienta a utilizar para la solución depende de la naturaleza del sistema, por ejemplo, si no es posible obtener el modelo del sistema no es posible utilizar técnicas basadas en el modelo como el caso del observador del Luenberger.

El estudio realizado sobre técnicas para el diagnóstico de fallas en este trabajo se basa en la generación de residuos a través de la comparación entre la salida del sistema respecto a una salida estimada, esto es posible usando un modelo de la planta a la que se le conoce como observador de estados.

Se realizó un análisis sobre el diseño de diferentes observadores, como son: el Observador de Luenberger y Luenberger con modos deslizantes, para estudiar su eficiencia en el diagnóstico de fallas aplicado a un sistema No lineal, conformado por resortes y amortiguadores los cuales son los encargados de absorber las vibraciones generadas por las irregularidades del terreno o vía, mientras mantiene los neumáticos siempre en contacto con la superficie lo que garantiza la seguridad del usuario. Así, el objetivo es realizar el diagnóstico de fallas o perturbaciones en las mediciones obtenidas por los sensores.

Gracias al trabajo desarrollado es que se puede concluir que se logro cumplir con los objetivos planteados en esta tesis, como lo son la implementación (simulación) de los observadores propuestos para el análisis del diagnóstico de fallas en los sensores, por lo que se puede hacer una *conclusión importante entre los Observadores de Luenberger y Luenberger modificado (modos deslizantes), presentado mejor resultado el observador con modos deslizantes, puesto que el residuo no se ve afectado por un cambio en los parámetros de la planta, es decir, el generador de residuos es invariante ante el cambio de parámetros.*

Bibliografía

- [1] Hedrick J K., Rajamani R., (1994). Observer Desing for Electronic Suspension Applications. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*.
- [2] Fischer D. and Isermann R. (2004). Mechatronic Semi-active and Active Vehicle Suspension. *Control Engineering Practice*, 12: 1353–1367.
- [3] ITKIS, Uri. *Control systems of variable structure*. Halsted Press, 1976.
- [4] Utkin, V. Variable structure systems with sliding modes. *Automatic control, IEEE Transaction on*, 22(2):212-222, 1977.
- [5] Clark, R. N., Fosth, D. C.,& Walton, V. M. (1975). Detection instrument malfunctions in control systems. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, (4), 465-473.
- [6] Himmelblau, D. *Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical proceses*. Elsevier Scientific Pub. Co., 1978.
- [7] Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and applications to modeling and control. *Systemsm, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, (1), 116-132.
- [8] Sugeno, M. y Kang, G. Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy sets and systems*, 28(1): 15-55, 1988.
- [9] Utkin, V. Principes of identification using sliding regimes. In *Soviet Physics Doklady*, tomo 26, pag. 271., 1981.
- [10] Walcott, B. y Zak, S. State observation of nonlinear uncertain dynamical systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 32(2):166-170, 1987.
- [11] Frank, P. *Fault diagnosis in dynamic systems via state estimation a survey*. 1987.
- [12] R.J Patton, P.M Frank and R.N Clark, *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, New York: Springer-Verlag, 2000.
- [13] Tanaka, K. y Wang, H. *Fussy control systems desing and analysis: a linear matrix inequality approach*. Wiley.Interscience, 2001.

- [14] Castillo, B, Anzures, J. Model-Based fault diagnosis usingg modo observers to Takagi-Sugeno fuzzy model. Intelligent Control, 2005. Proceeding of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation, pag. 625-657. IEEE, 2005. T
- [15] Anzures, J Y Castillo, B. The fault diagnosis problem: Slidind Mode Fuzzy dedicated observers approach. Fuzzy Systems, 2006 IEEE International Conference on pags. 1322-1328. IEEE, 2006.
- [16] Bouattour, M. Chandli, M., El Hajjaji, A., y Chaabane, M. Roboust fault detection observer desing for Takagi-Sugeno systems: S descripto approach. Control Automation (MED), 2010 18 th Mediterranean Conference on, pags 255-260. June 2010.
- [17] Shahram A. & Abbas S. (2009). Fault detection of vehicle suspension sustem using wavelet analysis. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility.
- [18] Yu-mei Liu, Xiao-ning Cao, Jian Su, Qiang Guo, Feng-ying, LU, Li cui. (2009). Suspension System Fault Diagnosis Metod Based on Fuzzy Mathematics. 9 th International Conference on Electronic Measurement & Instruments IEEE, 210-214.
- [19] Lozoya-Santos j., Tudon-Martinez J. M, Morales M., Ramirez M., Molina G. (2012a). Fault Detection for Automotive MR Damper. 14 th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, 1023.1028.
- [20] Rizvi H., Abid M., Qayyum khan A. (2013). Actuator Fault Diagnosis and Isolation in vehicle Active Suapension System. IEEE 9 th International Conference on Emerging Technologies. 15-26.
- [21] Odendaal H. and Jones T., (2014). Actuator Fault Detection and Isolation: And Optimized Parity Space Approach. Control Enginnering Parctice, 26: 222-232.
- [22] Hernandez-Alcantara D., Morales-Menendez R., Amezquita-Broock L. (2015). Fault Detection For Automotive Shock Absorber. Journal of Physics: Conference Series, 659.
- [23] Morales-Menendez R., Lozoya-Santos J., Hernadez-Alcantara D., Koenig D. (2013). Fault detection in Automotive Semi-active Suspension: Experimental Results. SAE Word Congress & Exhibition, vol 2013.
- [24] Hernandez-Alcantara D., Morales-Menendez R., Amezquita-Brooks L. (2015). Fault detection for Automotive Shock Absorber. Journal of Physics: Conference Series, 659.
- [25] J. M. S. A. J. Sergio Domingez, Control En Espacio de Estado, Madrid: PERSON-Prentice-Hall S.A, 2006.
- [26] V. H. T. Izquierdo, El problema de diagnostico de fallas en sensores:Diseño de Observadores Robustos de Entradas Desconocidas UMSNH-FIE, 2019.

- [27] K. Ogata, Ingeniería de control Moderna, Madrid: PEARSON EDUCATIONS, S.A, 2010.
- [28] R. C. Ruiz, Análisis de Sistemas Dinámicos y Control Automático, México: LIMUSA MEXICO, 1976.
- [29] P. E. A. Mendez, Detección de fallas en la suspensión de un automóvil basada en observadores adaptables, México: Tecnológico Nacional De México CENIDET, 2019.
- [30] J. Chen and R.J Patton, Robust Model-Based fault Diagnosis for Dinamic Systemms, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [31] R. J Patton, P.M Frank and R.N Clark, Fault Diagnosis in Dynamic Systems: Theory and Applications, New York: Prentice Hall, 1989.
- [32] P.M Franck, "Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-Based Redundancy-A survey and some new results" Automata, Vol. 26, No. 3, 1990, pp. 459-474.
- [33] E.Y Chow and A.S Willsky, "Analytical Redundancy and the Desing of Robust Failure Detection Systems", IEEE Trnas on Automatic Control, Vol. 29, No. 7, pp. 603-614.
- [34] R. Isermann, "Fault Diagnosis of machinas via Parameter Estimation and Knowledge Processing-Tutorial Paper" Vol. 29, No. 4, 1993, pp. 815-835
- [35] J.J Gertler "Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants" IEEE Contr. Syst. Mag. Vol. 8, No. 1988, pp. 3-11.
- [36] J.J Gertler, fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems, New York: Marcel Dekker, 1998.
- [37] V Krishnaswami, G. C. Luh and G. Rizzoni "Nonlinear parity equation residual generation for diagnosis of automotive engine fault" Contr. Eng. Practice vol. 3, No. 10, 1995, pp. 1385-1392
- [38] E. A. Garcia y P. M. Franck, "Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis: a survey" Contr. Eng. Practice Vol. 5, No. 5, 1997, pp. 663-670
- [39] Cristina Verde, S. Gentil, and R. Morales- Memndez. (2013). Monitoreo y diagnstico automtico de fallas en sistemas dinámicos. Mexico D.F.: Trillas.
- [40] Guillermo, Rossi, and Bocero Hamdi Prátula. (2012). Turbinas eólicas: Optimización en el pre-diagnóstico de fallas en el generador. Información tecnológica, 23, no.1, 153-162.
- [41] A. Akhenak, M. Chadli, D. Maquin and J. Ragot, "Sliding mode multiple observer for fault detection and isolation", Conference on Decision and Control, USA, 2003, pp. 953-958.

- [42] Ch. Edwards, S. K. Spurgeon and R.J Patton, "Sliding mode observer for fault detection and isolation" *Automatica*, Vol. 36, 2000, pp. 541-553.
- [43] J. A. Marin and B. C. Toledo, "An application of sliding mode observer to fault diagnosis" XXVI International Congress of electronic engineering ELECTRO 2004, Mexico, 2004, pp. 103-108.
- [44] B. C Toledo and J. A. Marin "Model-Based Fault Diagnosis Using Sliding Model Observers to Takagi-Sugeno Fuzzy Model" *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Cyprus, 2005, pp. 652-657.
- [45] Hrovat, D. Optimal active suspension structure for quarter-car vehicle models. *Automata*, 5(25), 845-860.
- [46] Worden, G. & Tomlinson, K. *Nonlinearity in Structural Dynamics, Detection, Identification and Modelling*. Institute of Physics Publishing, Bristol, Reino Unido, 2001.
- [47] Luque, P. *Ingenieria del automovil: Sistemas y comportamiento dinamico*. Primera edicion. España: Thomson 2004.
- [48] Goncalves, F. *Dynamic Analysis of Semi-Active Control Techniques for Vehicle Applications*. Master's thesis, Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg. EUA 2001.
- [49] Alberdi Urbieto, J. *Amortiguadores y suspensión*. Campus Tecnológico de la Universidad de Navarra, España: TECNUN. 2003.
- [50] Pichardo, J. M. *Tipos de suspensión independiente*. 2010.
- [51] CESVIMAP. *Elementos del automovil. Reparacion. Mantenimiento de vehuculos de autopropulso*, 2010.
- [52] Anzures, J. "Diagnostico de fallas en sistemas no lineales usando lógica difusa y observadores con modos deslizantes", Tesis Doctoral, Centro de estudios y de Estudios Avanzados del IPN, CINVESTAV unidad Guadalajara, 2007.
- [53] Kailath, T. (1980). *Linear systems (Vol. 1)* Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall
- [54] D. Luenberger. *Introduccion to Observers*. *Automatic Control, IEEE Transaction on* (Vol. 16, Issue:6), Dec 1971.
- [55] Fischer D., Kaus E., Isermann R. (2003). *Fault Detection for an Active Vehicle Suspension*. *Proceedings of the American Control Conference*, 4377- 4382.